

# 云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素

郭晓芳, 李旭东, 程东亚

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

**摘要:**云贵高原地理环境复杂,气温与降水空间差异显著,研究其气温与降水空间分布特征具有重要意义。基于 1981—2010 年云贵高原 180 个气象站的平均气温、降水数据,利用克里金法、反距离权重法、样条函数法等插值方法,探究了气温与降水空间分布特征及其影响因素。结果表明:(1)云贵高原气温空间分布总体南高北低,乌蒙山区和云南西北部的横断山区气温相对较低。(2)云贵高原降水空间分布总体在云南南部较高,云南东北和贵州西北降水相对较少,降水在局部地区受地形影响明显。(3)云贵高原气温与降水分布的各种插值平均百分比误差中,误差依次为  $SPLINE > TREND > OK > KED > IDW$ (降水),  $SPLINE > TREND > IDW > KED > OK$ (气温),气温 OK,降水 IDW 插值精度高,效果好。(4)云贵高原海拔每上升 1 000 m,气温下降范围在  $6.2 \sim 3.3^{\circ}\text{C}$ ,哀牢山(无量山)—横断山沿线海拔对气温的影响程度较高,但海拔对降水的影响相对复杂。

**关键词:**气温;降水;空间插值;影响因素;云贵高原

中图分类号:P423

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0159-05

## Spatial Distribution of Temperature and Precipitation and Its Influencing Factors in the Yunnan-Guizhou Plateau

GUO Xiaofang, LI Xudong, CHENG Dongya

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The geographical environment of the Yunnan-Guizhou Plateau is complicated, and the spatial differences between temperature and precipitation are significant. It is of great significance to study the spatial distribution characteristics of temperature and precipitation. Based on the average temperature and precipitation data of 180 meteorological stations in the Yunnan-Guizhou Plateau from 1981 to 2010, the Kriging method, inverse distance weight method, and spline function method were used to investigate the spatial distribution characteristics of temperature and precipitation and their influencing factors. The results show that: (1) the spatial distribution of air temperature in the Yunnan-Guizhou Plateau was generally higher in the south and lower in the north, and the temperature in the Umeng Mountains and Hengduan Mountains in northwestern Yunnan was relatively low; (2) the spatial distribution of precipitation in the Yunnan-Guizhou Plateau was generally higher in southern Yunnan, and there was relatively less precipitation in northeast Yunnan and northwestern Guizhou; precipitation was significantly affected by topography in some areas; (3) among the various interpolation average percentage errors of temperature and precipitation distribution in the Yunnan-Guizhou Plateau, the errors decreased in the order:  $SPLINE > TREND > OK > KED > IDW$  (precipitation),  $SPLINE > TREND > IDW > KED > OK$  (temperature), temperature OK, the precipitation IDW interpolation accuracy was high and the effect was good; (4) for every 1 000 m elevation rise in the Yunnan-Guizhou Plateau, the temperature decreased from  $6.2$  to  $3.3^{\circ}\text{C}$ ; The altitude along the Ailao Mountain (Wuliang Mountain) -Hengduan Mountain had a higher degree of influence on temperature, but the effect of altitude on precipitation was relatively complicated.

收稿日期:2019-12-29

修回日期:2020-03-20

资助项目:国家自然科学基金“西南山地流域城市化与生态环境的耦合关系研究——以贵州乌江流域为例”(41261039)

第一作者:郭晓芳(1995—),女,贵州思南人,在读研究生,研究方向为资源利用与低碳发展。E-mail:2633860658@qq.com

通信作者:李旭东(1969—),男,湖南邵东人,博士,教授,研究方向为人口地理与区域发展,应对气候变化与低碳经济。E-mail:616507732@qq.com

**Keywords:** temperature; precipitation; spatial interpolation; influencing factors; Yunnan-Guizhou Plateau

气温、降水是气候的两个关键因子,对生产活动、农业开发、资源利用具有重要影响。随着全球气候变暖,极端天气频繁,气温与降水变化受到政府和学者的广泛关注。研究气温与降水空间变化特征,可为区域生态环境治理、社会经济可持续发展提供参考,也可

为农业生产提供指导。

国内外学者基于不同尺度阐述各地区气温与降水特征、趋势、格局。如 K.Goubanova 等<sup>[1]</sup>对地中海地区气温与降水的研究;Ye Yang 等<sup>[2]</sup>对东亚季风区异常大尺度大气环流模式与温度和降水异常关系的研究;Jing Zheng 等<sup>[3]</sup>对中国气候带温度和降水极端值的时空趋势研究;王怀军等<sup>[4]</sup>对淮河流域极端气温和降水时空变化特征的研究;张万诚等<sup>[5]</sup>对云南极端气温的研究;蒋友严等<sup>[6]</sup>对甘肃气温的研究。综合来看,国内外研究对气温与降水的研究,主要探究其空间分布特征、气象灾害异常、大气环流等方面。空间插值方法研究上,何鹏等<sup>[7]</sup>通过反距离权重法、普通克里金法对四川省多年平均气温观测数据进行空间插值方法研究;闫星光等<sup>[8]</sup>以贵州丰水期月均降雨量为基础,分析了地形因素和气象因素与降水的相关性,并对克里金插值、径向函数插值、局部多项式插值等方法进行了对比;徐翔等<sup>[9]</sup>利用反距离权重法、普通克里金法、薄板光顺样条插值等方法对康滇区复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究。综合以往研究来看,目前的文献很好地揭示了不同地区气温或降水变化特征,可为区域资源利用提供一定的参考。

云贵高原是重要的山区高原,其地理环境复杂,气温与降水变化特殊,但目前较少有学者对其整体气温与降水特征进行研究。因此,本文基于 1981—2010 年云贵高原多年气温、降水平均数据,采用多种方法探究其空间分布特征,并进一步探究影响因素。期望研究结果可为云贵高原地质灾害防治预测、农业生产、社会经济发展提供指导,为相关研究提供有益的借鉴。

# 1 研究区概况

云贵高原是中国四大高原之一,位于中国西南部,主体包括云南省和贵州省,故本文的边界采用云南和贵州的行政区边界,其中剔除部分飞地,如贵州天柱县的部分飞地(图 1),区域总面积约 57 万 km<sup>2</sup>。该区域总体属于亚热带季风气候,部分地区与高原气候区相似。云贵高原是众多大江大河的流经地,如澜沧江—湄公河、金沙江、怒江等均流经于此。云贵

高原山地较多,西北部为横断山区,毗邻青藏高原,中部为乌蒙山区,中南部为哀牢山、无量山。区域内最高海拔 6 456 m,最低海拔 76 m,海拔相对高差大,同时也是世界上喀斯特地貌发育最典型地区之一。其山地众多,导致地理环境差异显著,气温与降水变化独特。

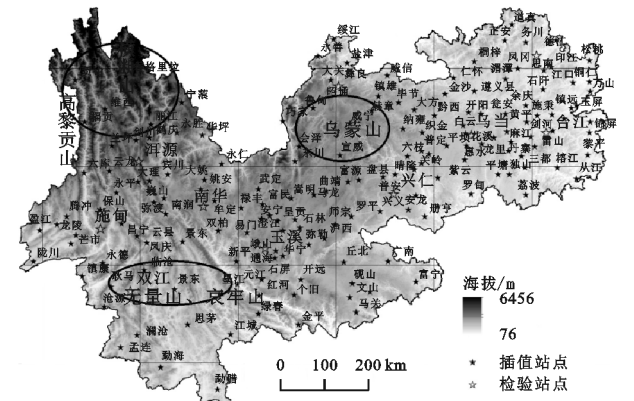


图 1 云贵高原气象站点及地形特征分布

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

气温与降水数据来源于中国气象网(<https://data.cma.cn>),DEM 数据下载于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),DEM 数据分辨率为 90 m,气温与降水数据为 1981—2010 年多年平均气温与降水数据。数据下载完成后,对各类数据进行空间匹配与异常值剔除,最终选取 180 个气象站点作为本文研究对象,其中贵州境内 76 个,云南境内 104 个。参考以往研究<sup>[10]</sup>,需选取一部分站点作为检验站点。本文共选取了 10 个气象检验站点,分布于云贵高原不同的位置,其占比约为 5.56%。

### 2.2 研究方法

(1) 克里金插值。该方法利用半导函数计算系数,得到最优估计值,优势在于考虑样本空间随机特征<sup>[11-12]</sup>。有普通克里金(OK)和泛克里金(KED)两种方法,公式分别为<sup>[11-12]</sup>

$$P_0 = \sum_{i=1}^n w_i p_i \tag{1}$$

$$P(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i p(x_i) \tag{2}$$

式中: $P_0$ 为待估计值; $w_i$ 为点  $i$  的已知值; $p_i$ 为点  $i$  的权重; $n$  为用于估算气象站点数量。 $p(x_i)$ 为以  $r$  为半径的领域内在观测数据点  $x_i$  处的观测压力值; $\lambda$  为权重系数; $P(x_0)$ 表示无偏最佳估计值。

(2) 反距离权重法(IDW)。反距离权重是对已

知点与待估点距离进行加权平均的值,原理是两点距离越大,差异越大,呈正相关<sup>[12-13]</sup>。公式见式(3):

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{i=0}^n d_i^{-p}} \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

式中: $d_i$ 为待估点到 $i$ 点距离。 $p$ 为指数,一般是2。

(3) 趋势面法(TREND)。趋势面法是在多项式回归分析后,得到适合地理要素空间分布规律,在曲面平滑程度的基础上,计算待估点的属性值<sup>[14]</sup>。公式见式(4):

$$Z(x, y) = \sum_{k=0}^{n_0} \sum_i^k a_k \cdot kx^{k-i}y^i + \omega \quad (4)$$

式中: $z(x, y)$ 表示气象站点估计值; $n_0$ 为多项式阶数; $\omega$ 为随机误差; $a_k$ 为观测点系数; $x, y$ 为平面直角坐标值。

(4) 样条函数法(SPLINE)。样条函数是利用多项式模拟样本点产生平滑插值,优势能较好体现局部地区的真实性<sup>[14]</sup>。公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n \beta_i R(d_i) + T(x, y) \quad (5)$$

式中: $Z$ 是估计值; $n$ 表示样本数量; $\beta$ 表线性方程系数; $d_i$ 为待估点到 $i$ 点距离; $x, y$ 表示平面直角坐标值。

(5) 地理加权回归。地理加权回归模型中的参数是表示区域地理位置的函数,其主要优势为能够将空间权重矩阵运用在线性回归模型之中,并很好地展现结果的空间结构分异<sup>[15-16]</sup>。公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \omega_i \quad (6)$$

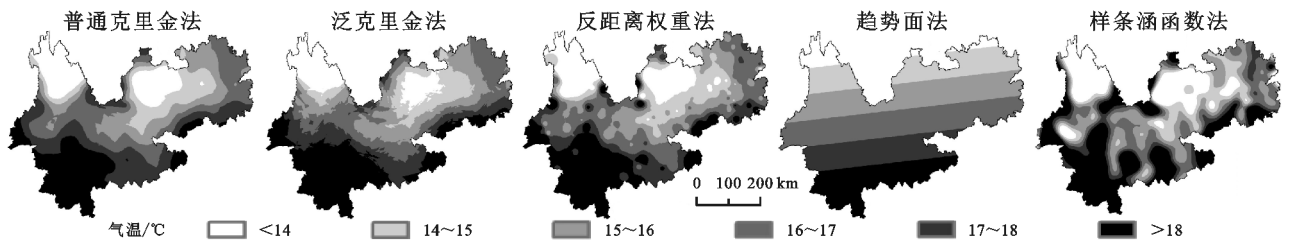


图2 云贵高原气温空间插值分布

### 3.2 降水空间分布特征

云贵高原降水高低值中心分布不均,其南部、东部是降水的高值中心,中部主要是低值中心(图3)。OK, KED 和 IDW, SPLINE 降水低值区在云贵高原中部, OK 和 IDW 在横断山东部出现降水低值区。IDW 多次出现高低值降水中心,如贡山、龙陵、西盟等小范围低值中心。TREND 降水量由南向北减少,大部分地区降水在 1 200 mm 以下,尤其兰坪—华平,彝良及仁怀—务川以北地区,降水在 1 000 mm 以下。SPLINE 降水分布连续性变弱,云贵高原西部(贡山—腾冲—镇康)出现降水高值,中部大范围是降水低值中心,在华坪、武定出现高于周围低值区降水。云贵高原该降

式中: $\beta_j(u_i, v_i)$ 表示第 $i$ 个区域上的第 $j$ 个回归参数; $x_{ij}$ 为第 $i$ 个样本点的第 $m$ 个解释变量; $\omega_i$ 为随机误差项。

## 3 结果与分析

### 3.1 气温空间分布特征

云贵高原气温总体分布南高北低,西北部(横断山)和中部(乌蒙山)气温较低,局部地区垂直下降明显(图2)。通过5种空间插值分析,云贵高原西北、乌蒙山区平均气温多低于 $14^{\circ}\text{C}$ ,受横断山、乌蒙山地形影响,气温随着海拔的升高而降低。OK 与 KED 在南部(北回归线以南)平均气温在 $18^{\circ}\text{C}$ 以上, OK 在开阳附近出现气温低值区,南部气温高主要是纬度低、太阳直射时间长影响。IDW 和 SPLINE 插值结果表明,低温与高温中心并存,小范围点状分布。SPLINE 气温在高原中部由永仁到勐海狭长延伸地带,及云贵高原外围边缘(如陇山、马光、富宁,贵州南部荔波—从江一带),均呈现气温高值区,而腾冲、洱源、牟定及贵州中部,出现气温低值区。可能是以下原因:气温在局部受水域环境影响,如洱海、滇池、抚仙湖等气温略低。澜沧江、金沙江等河谷地带,气候狭管效应明显,相对干热,气温明显高于周边。TREND 反映平均气温由南向北带状递减,体现温度随着纬度增加而降低。总体上看,高原南部区域气温均在 $18^{\circ}\text{C}$ 以上,即江城—思茅—澜沧,处于北回归线以南,气温高。

水分布特征可能是以下原因导致:(1) 哀牢山、无量山对南部季风抬升阻碍,南部降水丰富;(2) 北回线附近,纬度低,植物蒸腾大;(3) 昆明准静止锋对降水产生一定程度影响;(4) 地形复杂,易形成地区小气候。云贵高原中部以乌蒙山向贵州东部偏南降水逐渐减少,降水变化较缓慢。贵州降水值整体偏低,云南除南部,西部边缘地区出现降水高值,中部大范围处于降水低值区,降水变化大。

### 3.3 插值精度对比分析

本文选取云贵高原 10 个气象站点作空间插值检验,气温与降水的插值精度,均采用绝对值平均百分误差比较(图4),其降水是 SPLINE>TREND>OK>



KED>IDW,气温是 SPLINE>TREND>IDW>KED>OK。降水 SPLINE 与 IDW 两者之间的平均误差总体较大,气温除 SPLINE, TREND 外,插值百分精度差距不明显。降水、气温最小平均误差值分别为 13.04%, 3.85%;最大值分别为 18.91%, 8.15%。总体上,气

温 OK,降水 IDW 插值精度高,效果好;相反气温、降水 SPLINE 插值误差最大,对气温与降水空间分布存在局限。这可能受空间插值模型影响,气象站点密度、海拔、区域分区拟合等综合因素作用导致。故下文探究地形对气温、降水的影响。

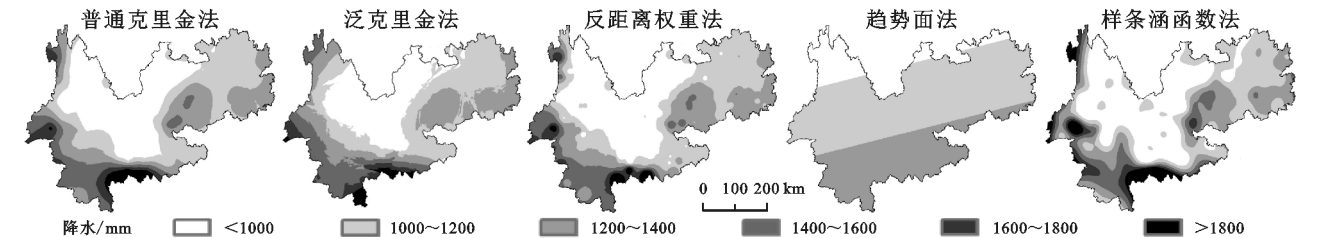


图 3 云贵高原降水空间插值分布

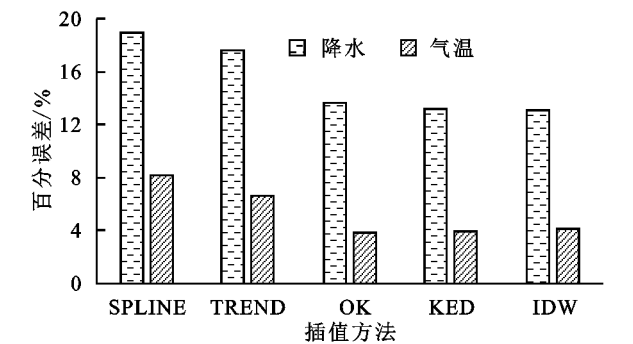


图 4 云贵高原气温降水空间插值平均百分误差

3.4 气温降水空间分布影响因素

3.4.1 气温、降水与影响因素相关分析 云贵高原气温及降水与经度、纬度、海拔影响因素相关分析为负相关(表 1)。气温与经度、纬度、海拔的 Pearson 相关性分别为-0.161, -0.514, -0.565;降水与其相关性分别为-0.023, -0.272, -0.284。云贵高原气温与纬度、海拔极显著相关,说明气温受纬度、海拔影响。降水与纬度、海拔也达到极显著相关,说明云贵高原降水受海陆位置影响。经度与降水、气温相关不显著。

表 1 云贵高原气温及降水影响因素相关分析				
参数	气温	降水	经度	纬度
降水	-0.210 **			
经度	-0.161	-0.023		
纬度	-0.514 **	-0.272 **	0.530 **	
海拔	-0.565 **	-0.284 **	-0.597 **	-0.206 *

注: \*\* 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的。 \* 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的。

3.4.2 气温降水线性回归分析 云贵高原气温、降水与纬度、经度、海拔关系回归方程表达式来看,其除经度对降水的影响系数外均小于 0,常数值偏大,云贵高原降水量与经度、纬度、海拔的常数分别为 913.276,

2 398.216, 1 312.592,降水区域差异大。 $R^2$  数值在 0~1 之间,为正相关;调整  $R^2$  是对模型中变量数进行补偿效果,因此调整  $R^2$  值小于  $R^2$  值。气温、降水与经度、纬度、海拔  $R^2$  最大值 0.320,最小值 0.001,拟合结果效果较好(表 2)。

3.4.3 气温与降水空间分布影响因素 云贵高原气温、降水地理加权回归参数(表 3),用纬度、经度、海拔 3 个影响因素对气温降水影响。其中,Bandwidth 是控制模型平滑程度,影响数据处理结果最佳值,云贵高原气温降水 Bandwidth 均为 132 481.62;Residual Squares 是模型残差平方和、Sigma 是残差估计标准差,均数值越小越好,表明指标选取科学。Effective Number 是模拟衡量值,均为 32.40;AICc 表示模型简洁性和精确性,年均气温、降水 AICc 分别为 340.40, 2 451.08。 $R^2$  数值在 0~1,值是正相关。 $R^2$  Adjusted 是对模型中变量数进行补偿效果,因此校正  $R^2$  小于  $R^2$ ,高原气温、降水  $R^2$ ,  $R^2$  Adjusted 分别 0.95, 0.55, 0.93, 0.46, 拟合结果基本满足需要。

表 2 云贵高原年均气温及降水线性回归方程

序号	变量关系	回归方程	$R^2$	调整 $R^2$
方程 1	气温与经度	$y = -0.115x + 28.133$	0.026	0.020
方程 2	气温与纬度	$y = -0.762x + 35.794$	0.264	0.260
方程 3	气温与海拔	$y = -0.002x + 19.203$	0.320	0.316
方程 4	降水与经度	$y = 2.050x + 913.276$	0.001	-0.005
方程 5	降水与纬度	$y = -49.374x + 2398.216$	0.074	0.069
方程 6	降水与海拔	$y = -0.148x + 1312.592$	0.080	0.075

海拔对云贵高原气温影响系数小于 0,呈负相关。在空间分布上,高原中部以乌蒙山为界线,海拔对气温影响在贵州和云南差异明显,云南海拔对气温的影响高于贵州。随海拔升高,气温呈现下降趋势。海拔每上升 1 000 m,气温下降范围在 6.2~3.3℃。随海拔每升高 1 000 m,高原西部云南地区海拔对气

温影响系数相对较高,达到 6℃ 以上,滇西南海拔对气温影响最小,气温下降约 3.3℃。海拔对云贵高原降水影响系数均有正负,空间影响分布趋势不一致。高原南部海拔对降水影响系数为 0.39,海拔每上升 1 000 m,降水量增加 390 mm。另外,在乌蒙山区海拔对降水的影响相对强烈,为负影响区。反之,在横断山高海拔区,降水减少 620 mm。

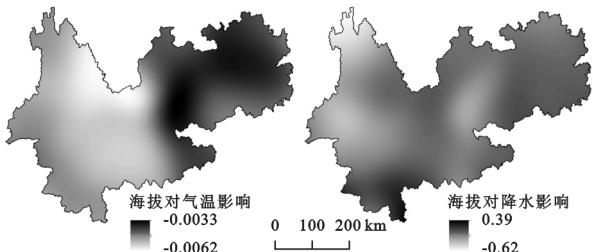


图 5 云贵高原海拔对气温、降水空间影响分布

表 3 地理加权回归参数检验

参数	Bandwidth	Residual Squares	Effective Number	Sigma	AICc	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>
降水	132481.62	6312613.64	32.40	206.80	2451.08	0.55	0.46
气温	132481.62	51.01	32.40	0.59	340.40	0.95	0.93

4 讨论与结论

4.1 讨论

云贵高原气温与降水空间分布是多因素综合的结果。高原东部贵州地区海拔对气温影响整体偏小,气温变化处于最高和最低之间,气温变化幅度不显著,而黔西南、东南气温变化相对较大。由于高原云南西部属于横断山区延伸地带,地形起伏大。贵州较云南地形起伏较小,而下垫面黔西南石漠化分布广,黔东南、西南森林资源丰富,对气温有调节作用。随海拔升高,地形阻挡条件下,一定程度上会增加降水。当海拔上升到一定高度,空气中水汽稀少,导致降水少。云南南部降水可能受海陆位置影响,距印度洋、太平洋近,加上海拔升高阻挡,海拔对降水影响大。高原东部贵州区域,受乌蒙山阻挡,位于东南季风迎风坡,降水丰富。但随着海拔越高,到山脉顶部降水减少。高原西部偏北部是横断山脉,随着山脉海拔高,降水减少。横断山区、乌蒙山对来自印度洋、太平洋水汽阻碍抬升。云贵高原冬季由于昆明准静止锋影响,持续时间长,在贵州一侧会形成降水,另一侧则降水少。另外,本文测度海拔对气温降水的影响中,经度影响并不明显,无法进行地理加权回归。而海拔对气温与降水的影响空间趋势并不完全一致。海拔对气温影响最为强烈的地区位于澜沧江—湄公河河谷两侧,这可能是区域峡谷地形的影响。海拔对降水的影响中,乌蒙山和云南横断山为负效应,可能是区域海拔较高,水汽无法深入导致。与此同时,这些地区也在一定程度上属于山地的背风坡,水汽较少,气候相对干热。利用多种插值方法测度云贵高原气温与降水空间分布特征,可为区域资源利用和经济发展提供参考。但云贵高原是山区,本文虽然采用多种方法探究,但也具有一定的局限性。

4.2 结论

(1) 云贵高原气温空间分布总体南高北低,乌蒙山

和云南西北部的横断山区气温相对较低。云贵高原气温分布总体随纬度增加而递减,西北部、中部气温较低。总体上南部(大致位于北回归线以南)平均气温在 18℃ 以上,西北、东北部平均气温低于 14℃,气温差异显著。

(2) 云贵高原降水空间分布总体在云南南部较多,云南东北和贵州西北降水相对较少,降水在局部地区受地形影响明显。云贵高原降水量在空间上由中部向外围逐渐增加,其中南部、东部降水丰富,中部相对偏少。

(3) 云贵高原气温与降水分布的各种插值平均百分比误差中,误差依次为 SPLINE>TREND>OK>KED>IDW(降水),SPLINE>TREND>IDW>KED>OK(气温);气温 OK,降水 IDW 插值精度高,效果好;相反气温、降水 SPLINE 插值误差最大,气温除 SPLINE、TREND 外,插值百分误差差距不明显。

(4) 云贵高原海拔每上升 1 000 m,气温下降范围在 6.2~3.3℃,哀牢山(无量山)—横断山沿线海拔对气温的影响程度较高,但海拔对降水的影响相对复杂。海拔对云贵高原降水影响系数均有正负,其影响系数范围在-0.62~0.39,空间影响分布趋势不一致。

参考文献:

[1] Goubanova K, Li L. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations[J]. Global and Planetary Change, 2007,57(1/2):27-42.

[2] Yang Y, Gao M, Xie N R, et al. Relating anomalous large-scale atmospheric circulation patterns to temperature and precipitation anomalies in the East Asian monsoon region [J]. Atmospheric Research, 2020, 232: 104679.

[3] Zheng J, Fan J L, Zhang F C. Spatiotemporal trends of temperature and precipitation extremes across contrasting climatic zones of China during 1956—2015 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,138(3/4):1877-1897.

- 2015,28(1):61-65.
- [12] 闫星光,吴琳娜,周涌,等.喀斯特地区月均降水协克里金插值方法研究:以贵州省为例[J].云南大学学报:自然科学版,2017,39(3):432-439.
- [13] 张波,谷晓平,古书鸿.贵州省最大日降雨量时空分布及重现期估算[J].水土保持研究,2017,24(1):167-172.
- [14] 钱莉莉,贺中华,梁虹,等.基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(1):10-14,19.
- [15] 莫跃爽,周秋文.贵州省 1960—2014 年不同地貌类型的气温变化特征[J].水土保持研究,2019,26(4):166-170,176.
- [16] 王涵,刘琦,任标,等.典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(3):6-12.
- [17] 邬伦,吴小娟,肖晨超,等.5 种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究:以深圳市为例[J].地理与地理信息科学,2010,26(3):19-24.
- [18] Marquínez J, Lastra J, García P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003,270(1/2):1-11.
- [19] 刘稳,刘国东,夏菁.近 57 年云南降水量时空格局及周期特性研究[J].人民长江,2018,49(S2):80-85,123.
- [20] 张余庆,陈昌春,尹义星,等.江西多年平均降水量空间插值模型的选取与比较[J].水土保持研究,2013,20(4):69-74.
- [21] 王国泰,张守平,杨清伟,等.基于空间插值方法的重庆降水信息展布[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):18-23.
- [22] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M].北京,北京:科学出版社,2006.
- [23] 许雯,董美莹,陈锋.基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究[J].气象与环境学报,2017,33(1):34-43.
- [24] 解恒燕,张深远,侯善策,等.降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究[J].水土保持研究,2018,25(3):117-121.
- [25] 李军,游松财,黄敬峰.中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J].生态环境,2006,15(1):109-114.
- [26] 李巍,范文义,毛学刚,等.降雨量空间插值方法比较研究[J].安徽农业科学,2014,42(12):3667-3669.
- [27] 白江涛,白建军,王磊,等.基于 GIS 的关中—陕南地区降雨量空间插值分析[J].安徽农业科学,2011,39(33):20872-20876.
- [28] 张仁平,张云玲,郭靖,等.新疆地区降水分布的空间插值方法比较[J].草业科学,2018,35(3):521-529.
- [29] 刘正佳,于兴修,王丝丝,等.薄盘光滑样条插值中 3 种协变量方法的降水量插值精度比较[J].地理科学进展,2012,31(1):56-62.

~~~~~

(上接第 163 页)

- [4] 王怀军,潘莹萍,陈忠升.1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J].地理科学,2017,37(12):1900-1908.
- [5] 张万诚,郑建萌,马涛,等.1961—2012 年云南省极端气温时空演变规律研究[J].资源科学,2015,37(4):710-722.
- [6] 蒋友严,黄进.基于 GIS 技术的甘肃省气温空间分布特征[J].干旱气象,2013,31(1):206-211.
- [7] 何鹏,张媛,高文波,等.四川省多年平均气温数据空间插值方法与影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2019,40(9):114-124.
- [8] 闫星光.基于 GIS 的云贵高原典型地貌区极端降水时空分布规律研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [9] 徐翔,许瑶,孙青青,等.复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2018,52(1):122-129.
- [10] 赵冰雪,王雷,程东亚.安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J].水土保持研究,2017,24(3):141-145.
- [11] 周体鹏.基于克里金插值法的昆明市 PM<sub>2.5</sub> 预测[D].昆明:云南大学,2016.
- [12] Kang-tsung Chang.地理信息系统导论[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [13] 解恒燕,张深远,侯善策,等.降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究[J].水土保持研究,2018,25(3):117-121.
- [14] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等.基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J].农业工程学报,2013,29(3):100-106,296.
- [15] 程东亚,李旭东.中国西南山地流域人口空间分布影响因素探究:以贵州乌江流域为例[J].西北大学学报:自然科学版,2019,49(5):791-800.
- [16] 庞瑞秋,腾飞,魏冶.基于地理加权回归的吉林省人口城镇化动力机制分析[J].地理科学,2014,34(10):1210-1217.